第 38 卷第 3 期
2018 年 2 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.38,No.3
Feb.,2018

DOI: **10.5846/stxb201612282693**

王娅,周立华,魏轩.基于社会-生态系统的沙漠化逆转过程脆弱性评价指标体系.生态学报,2018,38(3):829-840.

Wang Y,Zhou L H,Wei X.An evaluation index system of vulnerability of the desertification reversion process based on the socio-ecological systems theory. Acta Ecologica Sinica,2018,38(3):829-840.

基于社会-生态系统的沙漠化逆转过程脆弱性评价指标体系

王 娅[1],周立华[1,2,*],魏 轩[1,3]

1 中国科学院西北生态环境资源研究院,兰州 730000

2 中国科学院科技战略咨询研究院,北京 100190

3 中国科学院大学,北京 100049

摘要:土地沙漠化是当今世界最为严峻的生态环境问题之一。沙漠化逆转作为其反向转化过程,存在一定的脆弱性和不稳定性,即沙漠化逆转趋势减弱或反向发展的倾向。社会-生态系统理念是当今世界生态系统分析的新思路,从该视角界定沙漠化逆转过程的脆弱性概念,选取 Driving-Pressure-Status-Impact-Response (DPSIR)分析框架,以农牧交错带典型沙漠化逆转区宁夏盐池县为案例,针对沙漠化逆转的因果联系和过程特点,构建一套涵盖气候湿润指数、生态治理指数、沙地所占比例在内的 4 层、5 要素、41 指标的评价体系,进而探讨驱动力、压力、状态、影响、响应 5 项要素间的逻辑因果关系及其脆弱性定量化计算方法,以期科学评估沙漠化逆转过程的脆弱性,为该类型区沙漠化问题的进一步治理和调控提供科学依据。

关键词:沙漠化逆转;脆弱性;社会-生态系统;DPSIR 框架;评价指标体系;盐池县

An evaluation index system of vulnerability of the desertification reversion process based on the socio-ecological systems theory

WANG Ya[1],ZHOU Lihua[1,2,*],WEI Xuan[1,3]

1 *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*

2 *Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*

3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: Sandy desertification is one of the most severe ecological and environmental problems worldwide. Desertification reversion, as the reverse process of desertification expansion, has some instability and vulnerability due to disturbances by numerous socio-ecological factors. We call this phenomenon vulnerability of the desertification reversion process, and define it as the possibility and tendency of a reversion trend decline or reversal. Socio-ecological systems theory is a new form of ecological systems research. Based on this theory, we selected the driving-pressure-status-impact-response (DPSIR) framework and a typical reversed desertification area in Yanchi County as the study area. In this area, human activities have obviously interfered with natural processes and the expansion and reversal of desertification contrast sharply. We constructed an evaluation index system to assess the vulnerability of the desertification reversion process. This system includes four levels, five groups, and forty-one concrete indexes, including a moisture index, an ecological governance index, and sandy proportion. Finally, we explore the logical causality between drivers, pressure, status, impact, response, meanwhile discuss the quantitative calculation method of vulnerability. The objective of this study was to scientifically assess the

基金项目:国家自然科学基金项目(41471436);国家重点研发计划项目(2016YFC0500909)

收稿日期:2016-12-28; **网络出版日期**:2017-10-18

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lhzhou@ lzb.ac.cn

vulnerability of the desertification reversion process, and to provide support and a scientific basis to make decisions, manage, and regulate the desertification problem in the pastoral transitional zone.

Key Words: desertification reversion; vulnerability; socio-ecological systems; DPSIR framework; evaluation index system; Yanchi County

土地沙漠化是自然因素与人为因素综合作用的产物,其实质是社会-生态系统内部不相协调而导致的土地退化[1]。沙漠化逆转作为沙漠化的反向转化过程,是沙漠化防治的愿景。中国北方农牧交错区现已出现明显的逆转趋势[2-3],沙漠化面积约以 1280km^2/a 的速度减少[4]。马永欢[5]、赵哈林[6]、周立华[7]等学者认为,沙漠化逆转现象是由于土地利用方式改变和近几年生态保护措施导致的人类活动干扰强度减轻所致,王训明等[8]认为现代沙漠化的正逆过程主要受气候变化制约,人类活动影响较少,而王涛[9]等则认为沙漠化的发展和逆转过程都是自然生态系统和社会经济系统不断协调的结果。实际上,随着社会地理关系及区域经济联系的日益紧密,社会组织、政府政策、历史文化、跨尺度联系等因素对区域社会-生态系统的影响加强,仅从自然生态系统研究沙漠化问题及其逆转,不符合现代沙漠化的形成过程,难以反映沙漠化逆转的驱动机制。沙漠化及其逆转是一种典型的社会-生态系统管理问题,当应用社会-生态系统的理论框架进行评估与调控。

宋豫秦等[10]认为,中国北方农牧交错区的人地系统具有脆弱性、低耗散性的特点,该系统的相对封闭性和系统内部的自组织混乱是导致该地区沙漠化问题严重的主要原因。沙漠化逆转在时间尺度上是一个从无序到有序的过程,空间尺度上是一个高度有序的绝对不均匀体系[11],在其多重耗散结构作用下,必然存在一定的脆弱性和不稳定性,即面对社会-生态系统内外各种扰沌所带来的负熵增干扰后,逆转趋势减弱或反向发展的可能性。沙漠化逆转趋势能否持续? 逆转过程的脆弱性如何? 减缓或加剧脆弱性的因素为何? 是目前沙漠化研究亟待解决的科学问题。

本研究在参考前人对沙漠化及其逆转过程研究成果的基础上,以人类活动干扰明显、沙漠化正逆过程对比鲜明的宁夏盐池县为例,从社会-生态系统的视角出发,运用驱动力—压力—状态—影响—响应(Driving-Pressure-Status-Impact-Response, DPSIR)模型,遴选并构建沙漠化逆转过程脆弱性评价指标体系,识别关键影响因子和敏感性指标,全面反映北方农牧交错区沙漠化逆转的过程特点及社会-生态系统之间的动态影响,揭示沙漠化逆转驱动力、压力、状态、影响、响应间的逻辑关系及因果联系,以期对该地区沙漠化问题的系统治理和综合调控提供科学支撑。

1 沙漠化逆转过程脆弱性概念界定

沙漠化是一种以风沙活动为主要标志的土地退化过程,主要分布于干旱、半干旱以及部分半湿润地区,是由于过度人为活动与资源环境不相协调所产生的[12]。具体表现为可供农牧的土地面积减少、植物量及覆盖度减少、土地滋生能力退化、作物单位面积产量降低[13]。沙漠化逆转作为沙漠化的反向转化过程,是指沙漠化土地得到整治后的恢复过程[7],即生态系统在经受气候、政策等外部因素所带来的负熵增干扰后,在不同等级、尺度循环链条的"记忆"与"反抗"作用下,社会-生态系统从一种不可持续的状态逐步进入生态、经济、社会协调、可持续发展的过程。宏观层面上,主要表现为自然生态景观的变化,即植被生长、沙漠化面积减少;微观机理上为土壤含水率、地下水储量及生物多样性增加;内在本质上则表现为人类活动的频率受到控制,生产、生活方式和思想观念改变。

当前学术界对沙漠化的定义及其度量还没有形成完全一致的结论,使得确认是否存在逆转、评价逆转水平如何变得困难,区域沙漠化的作用机制与影响因素对不同时刻、不同主体在生物和社会认识上的重叠性、模糊性使得对该问题的评价缺乏适宜的表征方法[14],特别是对评价指标的遴选和应用存在争议。多数学者都基于沙漠化逆转是沙漠化的反向转化过程这一视角,用沙漠化评估指标的反向数据判断逆转程度[14]。赵哈

林等[6]通过分析以降水量、风速、地下水埋深、自然灾害、草地放牧、樵采、草地开垦、植被保护与建设为代表的影响沙漠化发展方向和过程的这些关键因素,建立了以自然因素指标、人为因素指标和植物指标为主的沙漠化正、逆过程的定性判断指标体系。然而,传统生态学视角的沙漠化逆转判断指标仅能反映某一区域的变化情况,而难以反映微观样本的变化程度和过程,因此 Liu[3]、王娅[15]等参考生态治理政策绩效评价指标[16],以兼具村域经济行为主体和区域环境感知主体双重属性的农户为切入点,通过农户认知测量方法,依据农户认知和行为响应等间接表现判定沙漠化逆转的趋势。

Liu[3]、王涛[4,9]、王娅[15]、王曼曼[17]等认为中国北方农牧交错区的沙漠化逆转现象是在国家政策制度的强制力下实现的,通过人为方式给予沙漠生态系统外部能量和物质补给来维持系统的负熵流发展,以提高整体环境和生态系统的有序性。一旦去除了生态政策的管制,当地脆弱的人—地系统和社会经济资源能否满足当地居民长期和短期的经济效用最大化?能否保障沙漠化逆转现象的稳定性及其逆转趋势的可持续性?沙漠化逆转是多重耗散结构下,生态系统在时间序列上从无序到有序的过程[11],任一系统要素的变化都会引起其他要素的连锁反应,其恢复过程必然存在着一定的不稳定性和脆弱性。参考国内外学者对于气候变化、生态恢复及社会-生态系统视角下脆弱性的研究及定义(表 1),结合沙漠化逆转过程的特点,将沙漠化逆转过程脆弱性界定为:沙漠化逆转现象对社会-生态系统内外各种扰动的敏感性,即因缺乏应对不利扰动的能力而使逆转趋势减弱或反向发展的倾向和可能性。

表 1　各研究领域的脆弱性概念

Table 1　Concept of vulnerability in three research field

研究视角 Perspective	相关术语 Relative terms	定义 Concept definition	来源 Sources
气候变化 Climate change	气候变化脆弱性	系统容易受到气候变化造成的不良后果影响或者无法应对其不良影响的程度,是系统外在气候变化的特征、强度和速率,敏感性和适应性的函数	IPCC 第三次评估报告[18]
	冰冻圈脆弱性	冰冻圈及其组成要素易受气候变化,尤其是温度和固态降水变化不利影响的程度,是气候的变率特征、幅度和变化速率及其敏感性和自适应能力的函数	杨建平等[19]
	沙漠化脆弱性	沙漠化系统对气候变化等负面影响的响应程度,是气候的变率特征、幅度和变化速率及其暴露度、敏感性和适应性的函数	任小玢等[13]
生态恢复 Ecological restoration	生态脆弱性	生态环境对外界干扰抵抗力弱,在被干扰后恢复能力低,容易由一种状态转变为另一种状态,而且一经改变很难恢复到初始状态的性质	乔青等[20]
	地下水脆弱性	污染物到达最上层含水层之上某特定位置的倾向性与可能性	National Research Council (U. S.)[21]
	水资源脆弱性	水资源系统在某一特定的环境下,受到气候变化和人类活动等外界因子的扰动和胁迫,其正常的结构和功能受到损坏的性质和状态,受损后难以恢复到原来功能和状态的性质	于翠松[22]
社会-生态系统 Socio-ecological system	社会脆弱性	暴露于自然因素或人为因素扰动下的社会系统,由于自身的敏感性特征和缺乏对不利扰动的应对能力而使系统受到的负面影响或损害状态	黄晓军等[23]
	社会-生态系统脆弱性	面临风险(压力)情况下社会-生态系统的敏感程度和应对能力,是其演替阶段所具有的功能结构的综合反映,是系统所受压力和自身敏感性相互作用的结果	余中元等[24]
	冰冻圈变化的脆弱性	干旱区环境—绿洲社会经济系统、寒区生态系统和其他人类-环境系统对冰冻圈变化的暴露度、敏感性及适应能力的函数	杨建平等[19]

2　社会-生态系统理念及分析框架选取

近年来,随着全球变化影响研究的深入及人类活动的加剧,环境问题的研究已由最初仅关注自然生态系统单一资源为中心的传统评估拓展到生态经济系统、人-环境耦合系统的经济、社会、环境、制度等多维度研

究[24]。Newell[25]、Folke[26]、Ostrom[27]等学者认为,单一学科视角的分析难以反映当前这些复杂环境问题的本质,应当进行跨学科、综合性的研究。因此,社会-生态系统理论为人类解决社会问题及生态问题提供了全新的视角,从该视角动态化、综合性地研究脆弱性已成为国际研究的新趋势[24]。当前全球用于社会-生态系统研究的分析框架主要有政策导向、生态中心主义、脆弱性及综合型四种类型,DPSIR、SESF 等十种框架[28](表 2)。

表 2 社会-生态系统分析框架的比较和总结[28]

Table 2 Comparison and conclusion of the frameworks for analyzing socio-ecological systems

框架 Frame	应用对象 Object	空间尺度 Scale	偏向 Preference	定位 Orientation	作用方式 Interaction	类型 Type	文献来源 Sources
DPSIR	政策制定者	任何尺度	人类中心主义	行为导向	S→E	政策导向型	Eurostat [29]
SESF	所有层级	地方和区域	人类中心主义	分析导向	S↔E	政策导向型	Ostrom [27]
TVUL	当地社区	当地	人类中心主义	行为导向	E→S	脆弱性型	Turner 等[30-31]
SLA	当地利益相关者	地方和区域	人类中心主义	行为导向	E→S	脆弱性型	Ashley 和 Carney[32]
ES	社会	区域或全国	生态中心主义	分析导向	S→E	生态中心主义型	Daily[33]
HES	所有层级	区域或全国	人类中心主义	分析导向	S↔E	综合型	Scholz 等[34]
MEFA	社会	区域或全国	生态中心主义	分析导向	S→E	生态中心主义型	Ayres[35]
MTF	所有层级	当地或区域	人类中心主义	分析导向	S↔E	综合型	Pahl.Wostl[36]
TNS	企业和地区	企业或区域	生态中心主义	行为导向	S→E	政策导向型	Burns 和 Katz[37]
ESA	社会	全球尺度	生态中心主义	分析导向	S→E	生态中心主义型	Schellnhuber[38]

注:该表根据参考文献[28]整理获得。DPSIR:驱动力-压力-状态-影响-响应,Driver-Pressure-Status-Impact-Response; SESF:社会-生态系统框架,Social-Ecological Systems Framework;TVUL:脆弱性框架,Vulnerability Framework;SLA:可持续生计框架,Sustainable Livelihood Approach;ES:生态系统服务,Ecosystem Services;HES:人与自然耦合系统,Human Environment Systems Framework;MEFA:物质和能量流分析,Material and Energy Flow Analysis;MTF:管理转型框架,Management and Transition Framework;TNS:自然方法,The Natural Step;ESA:地球系统分析,Earth Systems Analysis;S:社会系统,Social system;E:生态系统,Ecological system

诺贝尔经济学奖获得者 Ostrom 2009 年提出 SESF 框架,为解决长期困扰学术界的生态系统治理问题提供了理论指导[24]。该框架起源于政治学和社会科学领域,集体行动、公共池塘资源、自然资源管理是其理论基础,资源系统、资源单位、管理系统、用户是其核心子系统。作为偏向于人类中心主义的政策导向型框架,SESF 关注于社会系统对生态系统的宏观影响,虽然提供了一个较为全面的、多层级的诊断框架,但 4 个子系统间及其内部变量因子的设置没有考虑其因果关系和逻辑联系,在其脆弱性属性的评价中较难反映系统及元素间的影响机制,故该框架不适用于脆弱性分析。ES、MEFA、TNS、ESA 是典型的生态中心主义分析框架,更关注于生态系统对社会系统的宏观影响,不符合沙漠化逆转的过程特点及定义。而 HES、MTF 作为综合型框架,关注生态系统与社会系统的相互影响,其应用对象和面向的空间尺度更广泛,但都难以反映脆弱性的形成机制。TVUL、SLA 作为脆弱性分析框架,但均不适用于沙漠化逆转过程脆弱性的诊断,因为 SLA 的应用对象是微观主体,TVUL 虽能较好的反映脆弱性的内部作用机制,实现脆弱性的定量计算,但其作用方式侧重于生态系统对社会系统的影响,不符合沙漠化逆转过程脆弱性的定义与内涵,故选择定位于行为导向、作用类型由社会系统驱动生态系统的 DPSIR 分析框架。该框架作为偏向于人类中心主义的政策导向型框架,关注于社会系统对生态系统的宏观影响,在生态环境的综合性评估中应用最为广泛。其基本思想是,由于自然因素和人类经济活动的驱动给自然资源和环境带来了压力,改变了环境的状态和自然资源的质量与数量,给系统内部和外部造成了影响,人类社会则通过调整环境与经济政策对这些变化做出响应,减缓环境压力、维持系统的持续性[39]。DPSIR 框架充分表达了影响区域社会-生态系统及沙漠化逆转趋势的各因素的因果反馈机制及信息耦合关系,客观回答了社会-生态系统"状态如何、为何发生、怎样调控"的问题,较之 TVUL 框架更能揭示盐池县沙漠化逆转的过程特点及逆转驱动力、压力、状态、影响、响应五方面的因果关系和逻辑联系。

3　案例研究:宁夏盐池县沙漠化逆转过程脆弱性评价指标体系构建

3.1　研究区域概况

盐池县位于宁夏回族自治区东部,地处贺兰山-六盘山以东,北接毛乌素沙地,南靠黄土高原,平均海拔1600m,地理坐标106°30′—107°47′E,37°04′—38°10′N,是黄河中游重要的生态保护屏障。南北分布有黄土丘陵和鄂尔多斯缓坡两大地貌单元,属中温带大陆性气候,是典型的地形、气候、植被、农牧生产交错过渡区。该县辖4乡4镇101个行政村,总面积$8.67\times10^5 hm^2$,草原面积比例占64.25%,人口密度20.20人/km^2,农村人口比重81.08%,属偏牧型农牧交错区,曾是中国西北部沙漠化危害最严重的地区之一[40]。2000年沙漠化面积由1975年的1368.70km^2增加至3509.80km^2,占全县土地面积的51.80%[41]。国家生态保护政策实施后,当地沙漠化面积缩减至2010年的494.40km^2[42]。因此,盐池县是沙漠化逆转及沙漠化正逆过程对比鲜明的典型代表。

3.2　评价指标体系的构建

指标体系是沙漠化逆转过程脆弱性评价的基础,遴选指标的代表性、合理性,数据资料的易获得性及能否合理嵌入分析框架,会直接影响到评价结果的准确性。选择盐池县沙漠化逆转过程脆弱性指数作为目标层,驱动力、压力、状态、影响、响应5大类指标作为准则层,以完整的体现沙漠化逆转的综合过程,揭示潜在的自然和社会经济"驱动力"影响区域社会-生态系统的"压力",引起区域生态、资源、环境的"状态"改变,进而"影响"人类活动,促使一系列"响应"措施产生的完整因果链。依据准则层的发展过程特点和环境要素类型进行要素层的分层并设置相应的评价指标。依据指标选取的完整性、科学性和可操作性原则及数据的易得性,根据沙漠化逆转过程脆弱性的定义及国内外学者对沙漠化评价指标体系[43-46]和沙漠化逆转判定指标的研究[6,14],结合盐池县的实际情况与专家咨询意见,构建符合盐池县社会-生态系统发展特点及沙漠化逆转因果关系链的沙漠化逆转过程脆弱性评价指标体系。

3.2.1　驱动力指标分析

"驱动力"是引发区域生态环境变化的根本动力和潜在诱因,包括自然驱动力和社会驱动力两方面。马永欢等[41]认为自然因素对土地沙漠化的影响主要表现在降水量和蒸发量两方面,1981—2006年间自然因素对土地沙漠化的贡献率高达32.4%。盐池县地处鄂尔多斯台地向黄土高原过渡的干旱半干旱地带区,属典型的中温带大陆性气候,干旱少雨,风大沙多。多年平均降水量296—355mm,不足蒸发量的1/6,气候湿润指数作为气候变化的重要衡量指标是驱动沙漠化正逆过程的关键因素(表3)。

在现代沙漠化的形成过程中,人类活动在一定范围、一定程度上改变着自然过程的性质和强度[47],是导致生态和环境发生变化的根本驱动力。周立华等[7]认为中国的沙漠化问题主要发生在生态环境脆弱区,该类型区的人类活动主要是农牧业经济活动,而这些人类活动受当时主流政策支配或干扰的程度较大。2001年盐池县被列为退耕还林工程试点县,2002年底率先在全区实施草原禁牧封育政策。以上生态政策的实施迫使农户调整其传统的畜牧方式和种植结构,改变了生产资料流向和劳动力资源配置,使得草地资源得以恢复,沙漠化逆转的效果明显:沙漠化面积由2000年的3509.80km^2下降至2010年的494.40km^2,极重度荒漠化面积比例由1999年的10.18%下降至2010年的6.51%[1]。禁牧政策作为盐池县一项具有深远影响的生态保护政策,因其在全县范围内实施,禁牧面积所占比例及禁牧强度指标无意义,因此仅选用生态治理指数,即当年造林、退耕还林还草面积占区域国土面积的比例这一指标来表征生态政策对沙漠化逆转的驱动性(表3),而禁牧政策的效应则通过它对农户生产行为及区域产业发展的间接影响等指标来反映。

人类活动的强弱与资源用户的生计方式和适应策略有很大的关系。盐池县作为一个典型的农牧业生产县,农村人口13.91万,占总人口的81.08%。农户作为农村生产与消费等经济行为的微观主体,自然资源的使用者和生态环境的受影响者,是联系生态政策与生态环境的关键纽带,是沙漠化逆转过程中最重要的行为主体[15]。禁牧后,当地大部分农户减小了养殖规模,采用生计多样性策略,生计模式具有初步非农化倾向。

县域经济和城镇化的发展为农户非农生计的实现和可持续发展提供了充足的就业机会和收入来源,医疗、教育、住房等资源吸引着作为理性经济人的农户向城镇输移。人口城镇化通过输移农村人口,减轻了农业人口对生态环境的影响和消耗,有效促进了自然环境的改善和沙漠化的逆转,是驱动力指标中不可忽视的关键因子。人均 GDP 是衡量区域经济发展水平高低的重要指标。经济发展驱动力保障了资源用户的生产、生活需要,直接反映了人类社会的发展模式对区域生态系统的要求,是驱动力指标中不可忽视的关键因子(表 3)。

表 3　沙漠化逆转过程脆弱性评价驱动力(D)指标集

Table 3　Indicators of driving force on vulnerability of desertification reversion process of Yanchi County

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	要素层 Elements layer	指标层 Index layer	指标说明 Indicator explanation
沙漠化逆转过程脆弱性 Desertification reversion process vulnerability	驱动力	气候变化	气候湿润指数	地区年降水量与年蒸发量的比值-
		生态政策	生态治理指数	当年造林、退耕还林还草面积占区域国土面积的比例-
		社会发展	人口城镇化	城镇人口与区域总人口数的比率-
		经济发展	人均 GDP	表征县域经济发展的水平-

+表示指标 i 在评价体系中起正向作用,-表示指标 i 在评价体系中起负向作用

3.2.2　压力指标分析

"压力"是由人类活动间接引起的,是驱动力隐性作用下的一种显性表现,是施加在社会-生态系统上并促使其自然生态系统的现行状态发生变化的直接原因,一般包括承载压力、资源压力、开发压力 3 个方面,遴选的指标见表 4。承载压力是指特定环境条件下,生物个体的存在数量对区域生态系统的调节和供容能力造成的压力。盐池作为典型的农牧交错生产区,人是该地区社会-生态系统中最重要的行为主体,牛羊等牲畜则是生态系统最关键的活动主体,因此选择人口密度、人口自然增长率及牲畜密度来反映盐池县的生态承载压力。社会经济驱动力的发展对区域社会-生态系统产生作用,特别是县政府设定的年度地区生产总值预期目标、实际进行的各项固定资产投资及城镇化的空间扩张,加剧了人类活动的强度和范围,给地区生态环境带来了巨大的开发压力。资源压力主要来源于人类对自然资源消耗强度和利用效率两个方面,可用人均生态足迹和单位 GDP 能耗指标来反映人类生产活动对自然资源的占用与消耗。盐池县是一个水资源相对匮乏的地区,境内无大的河川径流,多年平均地表水资源量 0.269 亿 m^3,多年平均地下水资源量 0.29 亿 m^3,降雨是主要的水源补给方式,但月降水量差异大且空间分布不均,为解决人畜饮水和工农业用水的需要,大规模的开挖机电井眼。因此,采用机电井眼数、单位 GDP 用水量作为表征水资源开发压力和利用效率的指标。

表 4　沙漠化逆转过程脆弱性评价压力(P)指标集

Table 4　Indicators of pressure on vulnerability of desertification reversion process of Yanchi County

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	要素层 Elements layer	指标层 Index layer	指标说明 Indicator explanation
沙漠化逆转过程脆弱性 Desertification reversion process vulnerability	压力	承载压力	人口密度	地区人口总数与县域国土面积的比值+
			人口自然增长率	人口出生率与人口死亡率之间的差值+
			牲畜密度	地区牲畜总数与县域国土面积的比值+
		开发压力	地区生产总值预期目标	当年县政府制定的下年度国内生产总值发展目标+
			单位国土面积固定资产投资	当年固定资产投资总额与县域国土面积的比值+
			城镇空间扩张	当年建设用地面积+
		资源压力	单位 GDP 能耗	县域能源消耗量与国内生产总值的比值+
			人均生态足迹	县域生态占用总面积与同时期人口总数的比值+
			单位 GDP 用水量	工业、农业、企业用水量与国内生产总值的比值+
			机电井眼数	当年机电井眼总数+

+表示指标 i 在评价体系中起正向作用,-表示指标 i 在评价体系中起负向作用

3.2.3 状态指标分析

"状态"是指区域生态环境在气候、植被、土壤、景观方面的直观反映和现实表现,是由驱动力和压力共同作用引起的生态学可测特征的状态反映或趋势变化,是"影响"和"响应"的驱动因子和现实基础,具体指标见表 5。盐池县南北分布有黄土丘陵和鄂尔多斯缓坡两大地貌单元,干草原、荒漠草原、沙生和盐生植被、人工草场五种草场类型,是典型的地形、气候、植被、农牧业生产过渡带,生态环境比较脆弱。历史上,长时期屯垦、不合理耕种、超负荷畜牧和掠夺式采挖,使得沙漠成为鄂尔多斯缓坡丘陵区主要的地貌类型,五条较大的流沙带纵横其中。因此,选取沙漠化的关键形成因素:风速、温度、水资源等自然指标,沙漠化的关键判断指标:草地植被、土壤及生态景观等生态指标来反映沙漠化逆转过程的生态"状态"。地表径流、地下水储有量及地下水水质是衡量水资源"状态"的重要指标,同时也是影响动植物生长的关键因素,但是在类似盐池县的生态过渡区,黄土区和风沙覆盖区地下水的单元、特征有很大差别,潜水和承压水不完全相同,地下水埋深、矿化度指标代表性不明确,因此不予考虑。草地植被的"状态"应从其盖度和高度两方面考虑,土壤的含水率及有机质含量是反映土壤物理化学性质变化的典型代表,物种多样性及沙漠化土地面积比例是生态系统在其主体构成要素丰富度和自然景观破碎度方面的重要表现。考虑到县域范围景观的异质性及草群平均高度、土壤含水量、物种多样性指标的可获取性有待进一步检验。

表 5　沙漠化逆转过程脆弱性评价状态(S)指标集

Table 5　Indicators of status on vulnerability of desertification reversion process of Yanchi County

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	要素层 Elements layer	指标层 Index layer	指标说明 Indicator explanation
沙漠化逆转过程脆弱性 Desertification reversion process vulnerability	状态	侵蚀状况	当地大风日数	风速≥6m/s 的天数+
		气候状况	极端高温天数	一年内该县气温高于 35℃以上的总天数+
		水资源状况	地表径流量	一段时期内单位土地面积的地表径流量-
		植被状况	草地覆盖度	反映草地生长的盖度情况-
			草群平均高度	反映草地生长的高度情况-
		土壤状况	土壤含水率	农业生产的重要参数,反映土壤中水分含量的程度-
			土壤有机质	反映土壤中有利于植物生长的化学元素的含量-
		生态景观	物种多样性	给定地区动物、植物和微生物种类的数量及丰富性-
			沙地所占比例	沙漠化土地占县域国土面积的比例+

+表示指标 i 在评价体系中起正向作用,-表示指标 i 在评价体系中起负向作用

3.2.4 影响指标分析

"影响"是度量压力和驱动力作用下生态环境状态变化给社会发展、经济水平及人民生活带来变化的动态过程。社会经济发展的驱动和生态压力的作用使经济要素的结构和产业发展比例,农业人口的生计方式和就业方向、城镇就业机会及失业比率,农户增收渠道、收入情况及与城镇居民的收入差距等方面均发生变化。同时,禁牧政策通过限制放牧、草原围栏、补播改良退化草地等方式,改变了传统农牧业生产方式中生产资料和劳动力配置的数量和利用方式,为农户的生存和发展创造了机会元和新的经济机会链。该地区在政策适应的过程中逐步形成了"生计策略非农化—生计方式多样化—农户收入增加—就业趋向城市—向城镇迁移并定居—农业人口减少—草地等生态系统的压力减轻—自然资源需求和利用强度降低—沙漠化逆转"的互动关系链。另一方面,在这一过程中公众的生态环境感知、保护意识也发生了变化,通常用公众问卷调查的形式对以上主观性人文因素进行定性描述,一般较难量化且考虑到调研样本数量及时间尺度变化过程的精度和稳定性问题,在本文的指标设计中不予考虑。沙漠化逆转、草地生态系统性状改善带来了土地生产力的提高,主要表现在草地生产力,即每公顷鲜草产量的增加。另一方面,耕地粮食生产力的提升也不容忽视,因为农牧交错带生态和社会经济协调发展的关键是农、牧协调问题[48],耕地粮食生产力提高,在满足当地人口对粮食自给的耕地需求下,其余的耕地可改种青饲料或牧草等作物,以有效调节盐池县羊只持续增长下,牲畜需草量与产草量之间的供求问题,减轻天然草地的承载压力,实现农牧业之间的互补与协调。影响类评价指标的遴选

结果见表 6。

表 6 沙漠化逆转过程脆弱性评价影响(I)指标集

Table 6 Indicators of impact on vulnerability of desertification reversion process of Yanchi County

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	要素层 Elements layer	指标层 Index layer	指标说明 Indicator explanation
沙漠化逆转过程脆弱性 Desertification reversion process vulnerability	影响	产业结构	第二产业占 GDP 的比重	第二产业生产总值占同时期该地区 GDP 的比值+
			第三产业占 GDP 的比重	第三产业生产总值占同时期该地区 GDP 的比值-
		人口就业	非农生计人口比重	非农产业从业人数占同期该地区总人口的比值-
			城镇登记失业率	表征城镇人口的就业情况+
		收入差距	城乡收入比	城镇居民与农村居民人均收入的比值+
			农村家庭人均纯收入	表征农村家庭时间尺度上的增收情况-
		土地生产力	每公顷草地鲜草产量	表征草地生产力恢复的情况-
			每公顷耕地粮食产量	表征区域粮食生产能力-

+表示指标 i 在评价体系中起正向作用,-表示指标 i 在评价体系中起负向作用

3.2.5 响应指标分析

“响应”是人类为适应和预防生态环境“状态”的改变,减弱社会经济系统与生态系统间的压力和影响,提高沙漠化逆转的自然、人文驱动力而采取的一系列积极措施和反馈调节,包括社会经济应对手段和生态环境保护措施两方面,遴选指标见表 7。社会经济方面的响应,可通过喂养牲畜的农作物种植比例指标来反映微观层面上农户土地种植结构调整和利用行为的变化,用畜牧产业产值比重和羊只数量增长态势来反映宏观层面上该地区支柱产业在禁牧政策实施后的发展变化响应。教育的普及对提高社会-生态系统的恢复力具有持续的促进作用[49],同时教育也驱动了农村人口向城镇转移的行为,因此可从教育资源在资金和师资方面的投入来全面表达区域社会经济在教育措施上的响应。盐池生态环境保护措施的响应主要体现在生态保护和污染控制两个方面。盐池县位于农牧交错过渡带,生态环境脆弱,沙漠化问题及水土流失是不容忽视的生态问题。因此,通过加大环保投资是政府、企业到农户等环境主体进行生态保护的重要表现形式。通常,环境污染主要包括废水、废气及固体废弃物 3 种类型,污染控制则针对上述 3 类问题展开。由于本文研究的对象为沙漠化逆转过程的脆弱性问题,气体和固体废弃物对于沙漠化没有直接的影响,而水污染对生态环境的危害最大,因为盐池县土壤母质以含沙量较高的新黄土为主,土壤空隙大,下渗快,会直接导致地下水资源的污染,因此选用工业废水处理量占排放总量的比重指标来反映区域污染控制的力度。

表 7 沙漠化逆转过程脆弱性评价响应(R)指标集

Table 7 Indicators of response on vulnerability of desertification reversion process of Yanchi County

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	要素层 Elements layer	指标层 Index layer	指标说明 Indicator explanation
沙漠化逆转过程脆弱性 Desertification reversion process vulnerability	响应	土地利用	喂养牲畜的农作物种植比例	表征农户土地利用方式转变的直接表现-
		产业发展	畜牧业产值占 GDP 的比重	表征畜牧业发展的效益情况+
			羊只增长率	表征畜牧业发展的增长情况+
		教育投入	教育支出占财政支出的比例	表征对地方政府对教育问题的重视程度-
			老师学生配置比例	表征区域教育资源的占有和集聚程度-
		生态保护	当年生态建设投资占比	表征国家对生态保护做出的努力程度-
			节能环保支出占财政支出的比例	表征地方政府对生态环境安全的重视程度-
		污染控制	工业废水处理量占排放总量的比重	表征区域生态环境污染治理的强度和管理水平-

+表示指标 i 在评价体系中起正向作用,-表示指标 i 在评价体系中起负向作用

4　讨论

4.1　DPSIR5 项要素的逻辑因果关系探讨

DPSIR 作为偏向于人类中心主义的政策导向型框架,是基于因果关系组织信息及相关指数的概念模型[39],涵盖了社会-生态系统的诸多方面,包括社会、经济、生态等系统层级和资源、用户、管理等结构要素。从自然气候要素及人类社会经济发展的驱动要求出发,描述了人类活动给社会-生态系统带来的生态环境和资源消耗的"压力"在区域生态系统气候、植被、资源、景观等"状态"上的直观表现,生态系统的状态及质量反过来对社会系统的产业结构、人口就业、收入差距、思想观念、生产方式和技术产生"影响",可能会形成新的经济机会或社会-生态系统适应性循环互动链条,以此阐明人类活动及其最终效应导致的生态环境变化对社会系统的反馈。为使"驱动力—压力—状态—影响"循环互动,就需要通过人类制定相应的对策措施来响应和调控以上 4 个方面,从而促进区域社会-生态系统的可持续发展进程。其中,驱动力和压力表明了生态环境变化的原因,状态和影响则描述了变化发展的现状,响应提供了如何调控的对策和思路。综上,DPSIR 模型中 5 项要素的因果联系及逻辑关系如图 1 所示。

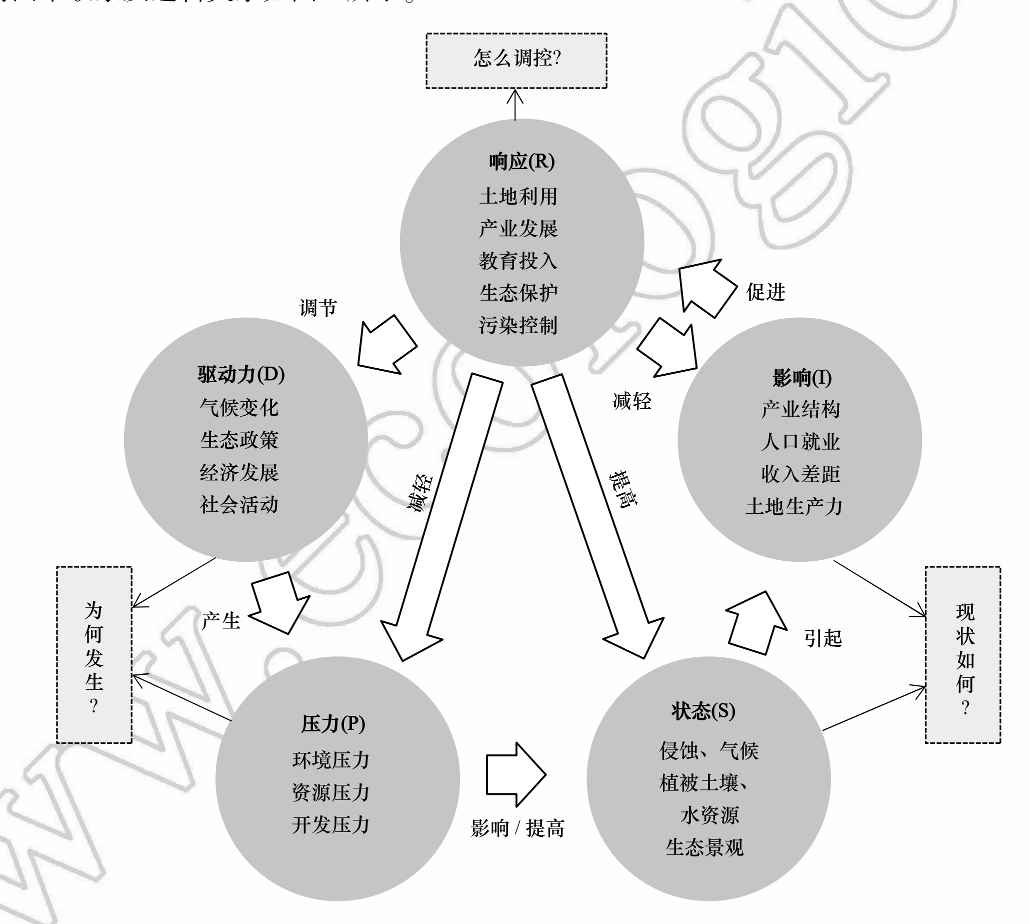


图 1　基于 DPSIR 框架的沙漠化逆转过程脆弱性逻辑关系图

Fig.1　The logic relation diagram of desertification reversion process and its vulnerability based on the DPSIR framework

4.2　基于 DPSIR 框架的沙漠化逆转过程脆弱性定量计算探讨

脆弱性评价是脆弱性研究中的重要内容,其目的是反映系统面对风险的敏感程度和应对能力,解析脆弱性的形成机制,为脆弱性调控提供方向[24]。目前较为常用的脆弱性评价方法主要有综合指数法、主成分分析法、函数模型法、人工神经网络模型法、决策树分析法和基于 GIS 的面向对象分析法、空间多准则评估法及图层叠置法等[19,23]。为具体反映研究对象脆弱性程度的大小,国内外研究者构建了不同类型的脆弱性指数计

算模型,其差异性主要体现在不同学者对脆弱性构成要素的理解不同及研究对象遭受的扰动类型不同这两方面,但其共性都是将脆弱性视为系统对负面影响因子的响应程度,是系统暴露度、敏感性与适应性的函数。一般暴露度表征系统的固有状态和特征,敏感性反映系统对内外部刺激因素易于感受的性质[13],在大部分脆弱性指数计算公式中作为表征系统变化的乘积影响因子,适应性则是系统中的核心主体要素采取趋利避害措施调整行为、适应变化的能力指代,是决定脆弱性强弱的关键要素,一些学者[50-51]将其作为脆弱性评价中应减去的正向作用,以 Luers[52]、Adger[53]为代表的大部分学者则普遍将脆弱性视为系统状态的敏感程度与其应对能力的商值。

沙漠化是典型的社会-生态系统管理问题,其逆转过程的发展趋势受到社会-生态系统方方面面的影响,包括促进该地区沙漠化逆转的驱动因素、自然生态系统所经受的压力及状态表现、社会系统的敏感性表现及响应五个要素。结合沙漠化逆转过程的特点及其脆弱性定义,在 DPSIR 分析框架的基础上,将驱动力、压力、状态、影响、响应之间的沙漠化逆转脆弱性关系表述为:社会-生态系统面临的“压力”与脆弱性形成的本底基础——生态系统“状态”和社会系统“影响”的敏感性乘积除以该系统核心行为主体的应对能力,包括沙漠化逆转的驱动力和响应措施。

4.3 研究不足与展望

基于社会-生态系统 DPSIR 分析框架的沙漠化逆转过程脆弱性评价指标体系的研究,充分反映了沙漠化逆转过程的特点及其脆弱性关系,指标数据易量化,具有一定的可操作性,但也存在以下不足:(1)指标体系的设计视角主要是基于时间和行为主体的角度,对沙漠化逆转的空间分异等情况考量不足。(2)由于传统文化、公众生态环境感知、保护意识、政策制度等人文因素多为定性描述,受样本数量、调研范围、数据积累等方面的影响,难以量化比较,因此本研究选取的人文因素仅限于明显界定的因素,对于主观因素的考察不足。(3)社会-生态系统是一个时间维、空间维、结构维相互作用,物质流、能量流、信息流相互影响的多尺度复杂系统。本文中指标体系的设计仅是基于封闭空间和独立系统的探讨,事实上相邻区域生态环境的变化或行业市场波动都会给该地区的人类活动和生态环境带来跨尺度的扰沌和影响。未来对该问题的研究应注重要素、资本的跨尺度影响。(4)当前架构的盐池县沙漠化逆转过程脆弱性评价指标体系尚存在评价指标的相关性高、数据的易获取性问题,有待在实证分析时进行适用性检验,可通过主成分分析法实现各子系统指标体系的降维,删除相关性较高的指标,实现评价指标体系的简化和适用性。

5 结论

DPSIR 框架为综合分析沙漠化逆转过程及其驱动力、压力、状态、影响、响应之间复杂的因果关系和逻辑联系提供了一个基本的概念模型。本文以宁夏盐池县为案例,基于 DPSIR 分析框架构建了沙漠化逆转过程脆弱性评价指标体系,涵盖了气候湿润指数、生态治理指数、沙地所占比例等 41 个指标,具有科学性、综合性、易量化的特点,可用于指示自然因素、人类活动等对沙漠化逆转的影响及人类为适应或预防这一影响而采取的一系列积极的响应对策和驱动措施。通过阐释沙漠化逆转的“状态如何,为何发生,怎么调控”的因果关系,提出沙漠化逆转过程脆弱性的定量化计算方法,可推广至其他沙漠化地区的沙漠化逆转问题研究中,例如沙漠化逆转过程脆弱性的评价、驱动机制的探析、致脆因子的诊断等,具有潜在的实用价值和政策指导意义。

参考文献(References):

[1] Wang Y, Zhou L H. Assessment of the coordination ability of sustainable social-ecological systems development based on a set pair analysis: a case study in Yanchi County, China. Sustainability, 2016, 8(8): 733-733.

[2] 祝列克. 中国荒漠化和沙化动态研究. 北京: 中国农业出版社, 2006: 5-13.

[3] Liu N, Zhou L H, Hauger J S. How sustainable is government-sponsored desertification rehabilitation in china? Behavior of households to changes in environmental policies. PLoS One, 2013, 8(10): e77510.

[4] 王涛, 宋翔, 颜长珍, 李森, 谢家丽. 近 35a 来中国北方土地沙漠化趋势的遥感分析. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1351-1356.

[5] 马永欢, 周立华, 樊胜岳, 董朝阳. 中国土地沙漠化的逆转与生态治理政策的战略转变. 中国软科学, 2006, (6): 53-59.
[6] 赵哈林, 周瑞莲, 赵学勇, 张铜会. 科尔沁沙地沙漠化正、逆过程的地面判别方法. 中国沙漠, 2008, 28(1): 8-15.
[7] 周立华, 朱艳玲, 黄玉邦. 禁牧政策对北方农牧交错区草地沙漠化逆转过程影响的定量评价. 中国沙漠, 2012, 32(2): 308-313.
[8] 王训明, 李吉均, 董光荣, 夏敦胜. 近 50a 来中国北方沙区风沙气候演变与沙漠化响应. 科学通报, 2007, 52(24): 2882-2888.
[9] 王涛, 朱震达, 赵哈林. 我国沙漠化研究的若干问题——4. 沙漠化的防治战略与途径. 中国沙漠, 2004, 24(2): 115-123.
[10] 宋豫秦, 张力小, 曹淑艳. 耗散结构理论在我国北方农牧交错带人地系统分析中的应用. 中国沙漠, 2000, 20(S1): 15-21.
[11] 崔旺诚. 沙漠化逆转过程的耗散理论应用. 干旱区地理, 2003, 26(2): 150-153.
[12] 朱震达, 吴正, 刘恕. 中国沙漠概论. 北京: 科学出版社, 1980.
[13] 任小玢, 胡光印, 董治宝. 沙漠化脆弱性的概念与评价. 中国沙漠, 2015, 35(1): 40-50.
[14] Liu N, Zhou L H, Chen Y, Huang S. Identification and evaluation of desertification reversal in China: indicators and methods review. Sciences in Cold and Arid Regions, 2014, 6(3): 190-200.
[15] 王娅, 周立华, 陈勇, 路慧玲, 魏轩. 农户生计资本与沙漠化逆转趋势的关系——以宁夏盐池县为例. 生态学报, 2017, 37(6): 2080-2092.
[16] 樊胜岳, 张卉, 乌日嘎. 中国荒漠化治理的制度分析与绩效评价. 北京: 高等教育出版社, 2011.
[17] 王曼曼, 吴秀芹, 吴斌, 张宇清, 董贵华. 近 25a 盐池北部风沙区土地系统变化及空间集聚格局分析. 农业工程学报, 2014, 30(21): 256-267.
[18] IPCC. Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
[19] 杨建平, 张廷军. 我国冰冻圈及其变化的脆弱性与评估方法. 冰川冻土, 2010, 32(6): 1084-1096.
[20] 乔青, 高吉喜, 王维, 田美荣, 吕世海. 生态脆弱性综合评价方法与应用. 环境科学研究, 2008, 21(5): 117-123.
[21] National Research Council (U. S.). Ground water vulnerability assessment-predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. Washington D C: National Academy Press, 1993.
[22] 于翠松. 环境脆弱性研究进展综述. 水电能源科学, 2007, 25(4): 23-27.
[23] 黄晓军, 黄馨, 崔彩兰, 杨新军. 社会脆弱性概念、分析框架与评价方法. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1512-1525.
[24] 余中元, 李波, 张新时. 社会生态系统及脆弱性驱动机制分析. 生态学报, 2014, 34(7): 1870-1879.
[25] Newell B, Crumley C L, Hassan N, Lambind E F, Pahl-Wostle C, Underdalf A, Wassona R. A conceptual template for integrative human—environment research. Global Environmental Change, 2005, 15(4): 299-307.
[26] Folke C, Carpenter S, Elmqvist, Gunderson L, Holling C S, Walker B. Resilience and sustainable development: Building adaptive capacity in a world of transformations. Ambio: A Journal of the Human Environment, 2002, 31(5): 437-440.
[27] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. Science, 2009, 325(5939): 419-422.
[28] Binder C R, Hinkel J, Bots P W G, Pahl-Wostl C. Comparison of frameworks for analyzing social-ecological systems. Ecology and Society, 2013, 18(4): 26-26.
[29] Eurostat. Towards environmental pressure indicators for the EU. Bethesda M D: Congressional Information Service, 1999.
[30] Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, McCarthy J J, Corell R W, Christensen L, Eckley N, Kasperson J X, Luers A, Martello M L, Polsky C, Pulsipher A, Schiller A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003, 100(14): 8074-8079.
[31] Turner B L, Matson P A, McCarthy J J, Robert W C, Christensen L, Eckley N, Hovelsrud-Broda G K, Kasperson J X, Kasperson R E, Luers A, Martello M L, Mathiesen S, Naylor R, Polsky C, Pulsipher A, Schiller A, Selin H, Tyler N. Illustrating the coupled human-environment system for vulnerability analysis: three case studies. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003, 100(14):8080-8085.
[32] Ashley C, Carney D. Sustainable livelihoods: lessons from early experience. London: Department for International Development, 1999.
[33] Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. Washington D C: Island Press, 1997.
[34] Scholz R W, Binder C R, Lang D J. The HES-Framework // Scholz R W. Environmental literacy in science and society: from knowledge to decisionCambridgeCambridges. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 453-462.
[35] Ayres R U. Resources, environment and economics: Applications of the materials/energy balance principle. New York: John Wiley & Sons, 1978.
[36] Pahl-Wostl C. A conceptual framework for analysing adaptive capacity and multi-level learning processes in resource governance regimes. Global Environmental Change, 2009, 19: 354-365.
[37] Burns S, Katz D. ISO 14001 and the natural step framework. Perspectives, World Business Academy, 1997, 11: 7-20.
[38] Schellnhuber H J. 'Earth system' analysis and the second Copernican revolution. Nature, 1999, 402(6761): 19-23.
[39] 李玉照, 刘永, 颜小品. 基于 DPSIR 模型的流域生态安全评价指标体系研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2012, 48(6): 971-981.
[40] 樊胜岳, 周立华, 马永欢. 宁夏盐池县生态保护政策对农户的影响. 中国人口·资源与环境, 2005, 15(3): 124-128.

[41] 马永欢, 周立华, 朱艳玲, 李斌. 近 50 年来盐池县土地沙漠化驱动因素的时间变化. 干旱区研究, 2009, 26(2): 249-254.

[42] 马明德, 谢应忠, 米文宝, 刘长宁, 马甜, 奥海玮. 宁夏东部风沙区土地利用/覆盖变化及其生态效应研究——以宁夏回族自治区盐池县为例. 干旱区资源与环境, 2014, 28(4): 8-14.

[43] Bakr N, Weindorf D C, Bahnassy M H, El-Badawic M M. Multi-temporal assessment of land sensitivity to desertification in a fragile agro-ecosystem: environmental indicators. Ecological Indicators, 2012, 15(1): 271-280.

[44] Mohamed E S. Spatial assessment of desertification in north Sinai using modified MEDLAUS model. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(12): 4647-4659.

[45] D'Odoricoa P, Bhattachana A, Davisa K F, Ravib S, Runyana C W. Global desertification: drivers and feedbacks. Advances in Water Resources, 2013, 51: 326-344.

[46] Symeonakis E, Karathanasis N, Koukoulas S, Panagopoulos G. Monitoring sensitivity to land degradation and desertification with the environmentally sensitive area index: the case of Lesvos Island. Land Degradation & Development, 2016, 27(6): 1562-1573.

[47] 王涛, 吴薇, 赵哈林, 胡孟春, 赵爱国. 科尔沁地区现代沙漠化过程的驱动因素分析. 中国沙漠, 2004, 24(5): 519-528.

[48] 徐建英, 柳文华, 常静, 马礼. 基于农户响应的北方农牧交错带生态改善策略. 生态学报, 2010, 30(22): 6126-6134.

[49] 王群, 陆林, 杨兴柱. 千岛湖社会——生态系统恢复力测度与影响机理. 地理学报, 2015, 70(5): 779-795.

[50] 任志远, 张晗. 银川盆地土地利用变化对景观格局脆弱性的影响. 应用生态学报, 2016, 27(1): 243-249.

[51] Romieu E, Welle T, Schneiderbauer S, Pelling M, Vinchon C. Vulnerability assessment within climate change and natural hazard contexts: revealing gaps and synergies through coastal applications. Sustainability Science, 2010, 5(2): 159-170.

[52] Luers A L. The surface of vulnerability: an analytical framework for examining environmental change. Global Environmental Change, 2005, 15(3): 214-223.

[53] Adger W N. Vulnerability. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 268-281.